

УДК 533.951

**А. В. Агапитов**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
Інститут космічних досліджень НАКАУ — НАНУ, Київ  
agapit@univ.kiev.ua

## ДИНАМИКА НИЗКОШИРОТНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ ЗЕМЛИ ПО МАТЕРИАЛАМ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОЕКТА THEMIS

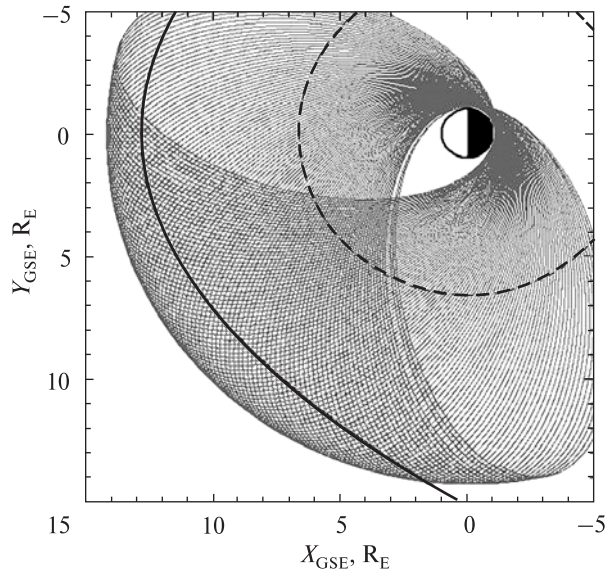
*Запропоновано статистичне дослідження параметрів руху поверхні магнітопаузи за матеріалами вимірювань магнітного поля та плазмових параметрів системою THEMIS у квітні — вересні 2007 р. За цей період система THEMIS більш ніж 300 разів перетинала магнітопаузу. Більш ніж половина перетинів були неодноразовими. Були проаналізовані напрямки нормалей до поверхні магнітопаузи, що визначались при перетині, та швидкість її зміщення. Запропоновано алгоритм розділення різних випадків руху поверхні магнітопаузи: одновимірного руху як цілого (flapping) та руху по поверхні магнітопаузи двовимірних хвильових структур (waving). Поверхневі хвилі спостерігаються на флангах магнітосфери, а одновимірні осциляції — в основному в денному секторі. Для хвильових структур характерна більша швидкість зміщення поверхні: 50–150 км/с (для одновимірних осциляцій 10–70 км/с). Генерація хвильових структур на флангах магнітосфери пов'язана з осциляціями підсонячної магнітосфери (cavity modes) та пов'язаними з цими осциляціями неоднорідностями потоку плазми в магнітошарі. При квазіперіодичному характері руху підсонячної магнітопаузи на флангах магнітосфери спостерігаються хвилеподібні збурення. Амплітуда зміщення поверхні може істотно збільшуватись за рахунок розвитку нестійкості Кельвіна — Гельмгольца.*

### ВВЕДЕНИЕ

Магнітопауза (далеє МП) — это внешняя граница магнітосфери Землі, которая представляет собой тонкий пограничный токовый слой, отделяющий магнітосферу от плазмы солнечного ветра. МП — динамичная структура, которая находится в постоянном движении. Равновесное положение МП определяется балансом давлений между плазмой магнітослоя и давлением магнітного поля внутри магнітосфери. Смещение положения МП может быть вызвано как изменением внешних параметров (вариации динамического давления солнечного ветра, изменение знака  $B_z$ , давления плазмы магнітослоя, вариации плотности на форшоке [12, 19]), так и за счет внутренних магнітосферных процессов (суббуревые процессы, перераспределение токов магнітосфери или пересоединение силовых линий магнітного поля Земли с межпланетным магнітным полем [22]). Мониторинг МП в рамках проектов ISEE и AMPTE [17]

позволил проводить систематические оценки скорости движения и толщины МП на низких широтах в зависимости от параметров солнечного ветра. Средняя скорость смещения поверхности МП 60 км/с, толщина в диапазоне от 100–1700 км (от единиц до десятков ларморовских радиусов протонов солнечного ветра). Многоточечные наблюдения системы Cluster (подробнее [8]) дали большой материал по параметрам МП и характеристикам ее движения в высоких геомагнитных широтах и в областях каспов.

Основная цель данной работы — определить параметры и природу многократных пересечений МП (когда за 1–2 ч регистрировались несколько пересечений МП). Средняя скорость смещения положения МП (около 40 км/с) намного больше скорости движения космического аппарата, поэтому такие наблюдения интерпретировались как периодические перемещения поверхности МП, например в работах [21] по измерениям космического аппарата «Маринер-5» в 1967 г. и [1] на основе наблюдений космического аппарата IMP-2. Квазипериодические



**Рис. 1.** Проекция траектории модуля Th A в марсе – августе 2007 г. на плоскость  $XY$  системы координат GSE. Показано модельное положение МП для невозмущенного динамического давления солнечного ветра [9]

смещения положения магнитопаузы исследовались по материалам измерений космических аппаратов GOES 6 и GOES 7 [5], «Интерболл Тайл» [20], «Геотайл» [13], «Кластер» [15, 16] и др.

В предлагаемой работе на основе измерений магнитного поля, плотности плазмы и скорости плазменных потоков в 150 случаях многократных пересечений МП космическими аппаратами проекта THEMIS в 2007 г., определены параметры смещения поверхности магнитопаузы Земли в низких геомагнитных широтах. Предложена методика определения характера движения МП на основе анализа параметров магнитного поля при пересечении поверхности МП космическим аппаратом. В зависимости от распределения направления нормалей к поверхности МП выделяются одномерное смещение МП и движения по поверхности МП двумерных возмущений и поверхностных волн.

### ПРОЕКТ THEMIS

Система космических аппаратов THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) состоит из пяти одинаково оснащенных модулей. Вывод на орбиту был осуществлен 17 февраля 2007 г. Основная задача проек-

та — многоточечное исследование феномена суббурь. Подробные сведения об оснащении и научных задачах проекта можно найти в работе [2] и на сайте проекта <http://themis.ssl.berkeley.edu/index.shtml>.

В нашей работе были использованы данные измерений магнитного поля феррозондовых магнитометров FGM [3], а также измерения плазменных параметров, выполненные электростатическими анализаторами ESA [14].

Рабочая конфигурация космических аппаратов системы THEMIS: апогей первого модуля (Th A — Alfvén)  $30 R_E$ , второго (Th B — Birkeland) —  $20 R_E$ , третий и четвертый (модули Th C — Chapman и Th D — Dungey) — на одинаковой орбите с апогеем  $12 R_E$ , пятый аппарат (Th E — Eschenhagen) на орбите с апогеем  $10 R_E$ . Система вышла на рабочую конфигурацию в сентябре 2007 г. С 17 февраля по 15 сентября 2007 г. THEMIS проводил измерения в промежуточной конфигурации. В этот период все космические аппараты находились на общей орбите с перигеем  $1.3 R_E$  и апогеем  $15.4 R_E$ . Взаимная пространственная конфигурация космических аппаратов была почти линейной, наклонение орбиты  $13.7^\circ$ . Большой период времени система проводила измерения поблизости от МП. В результате анализа данных был накоплен значительный статистический материал по параметрам движения МП. Проекция орбиты Th A на плоскость  $XY$  системы координат GSE за период апрель — октябрь 2007 г. показана на рис. 1.

### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

МП в первом приближении может быть описана тангенциальным или вращательным магнито-гидродинамическим разрывом. В данной работе были проанализированы направления нормалей к МП (метод минимума вариаций магнитного поля MVAB) и скорости ее движения по алгоритмам де Хоффмана-Теллера (de Hoffman-Teller [7]), минимизации разности Фарадея (MFR, [10]) и тайминг-анализа (timing technique, [18]) при пересечении космическими аппаратами THEMIS.

Анализ пространственных параметров поверхности МП проводился в собственной системе

координат МП. Система координат МП локальна и зависит от ориентации МП в данной точке пространства. В этой системе координат ось  $\mathbf{e}_1$  отложена вдоль направления минимума вариаций магнитного поля при пересечении токового слоя МП и направлена наружу магнитосферы. Таким образом, ось  $\mathbf{e}_1$  перпендикулярна к поверхности МП. Ось  $\mathbf{e}_3$  отложена вдоль направления максимума вариации магнитного поля при пересечении токового слоя МП. Ось  $\mathbf{e}_2$  дополняет базис до правой тройки векторов. В дальнейшем базис собственной системы координат МП всегда определен относительно системы координат *GSE*. Для его определения в работе использовался метод минимизации вариаций магнитного поля [23]. В данной методике анализ минимума вариаций применяется к вектору магнитного поля, измеряемого дискретно при пересечении токового слоя, который представляется идеализировано одномерным (в собственной системе координат:  $\partial/\partial x = 0$ ,  $\partial/\partial y = 0$ ). Из условия равенства нулю  $\text{div} \mathbf{B} = 0$  получаем  $\partial B_z/\partial z = 0$ , то есть  $B_z$  не зависит от  $z$ . В работе [23] показано, что направление нормали к токовому слою МП  $\mathbf{n}$  совпадает с направлением минимума вариации вектора магнитного поля при пересечении токового слоя МП. Таким образом, направление оси  $\mathbf{e}_1$  может быть определено путем минимизации величины  $\sigma$ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left| (\mathbf{B}^{(m)} - \langle \mathbf{B} \rangle \cdot \mathbf{n}) \right|^2, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}^m$  — значения вектора магнитного поля в различные моменты времени,  $M$  — количество измерений в выборке;  $\langle \mathbf{B} \rangle$  — среднее значение вектора магнитного поля:

$$\langle \mathbf{B} \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{B}^{(m)}. \quad (2)$$

Дополнительным условием выступает нормировка нормального вектора  $|\mathbf{n}| = 1$ . Для реализации этого ограничения в работе [23] предложен метод множителей Лагранжа. Полученную однородную систему уравнений можно записать в матричной форме:

$$\sum_{\nu=1}^3 M_{\mu\nu}^B n_\nu = \lambda_\mu n_\mu, \quad (3)$$

где  $\mu$  и  $\nu$  — компоненты в декартовой системе (в нашем случае *GSE*), а  $M_{\mu\nu}^B = \langle B_\mu B_\nu \rangle - \langle B_\mu \rangle \langle B_\nu \rangle$  — матрица вариаций магнитного поля с собственными значениями  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Собственные вектора матрицы  $\mathbf{M}^B$  ортогональны и образуют базис собственной системы координат МП.

Скорость смещения и толщина МП были проанализированы на основе методики определения скорости движения плоского разрыва (например, ударной волны или МП) в космической плазме, предложенной в работе [7]. Методика основана на поиске скорости движения поверхности разрыва, минимизирующей выражение [11]

$$D = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left| (\mathbf{V}^{(m)} - \mathbf{V}_{HT}) \times \mathbf{B}^{(m)} \right|^2, \quad (4)$$

для конечной выборки измерений магнитного поля  $\mathbf{B}^{(m)}$  и скорости потока плазмы  $\mathbf{V}^{(m)}$ . Минимизация выражения  $\nabla_V D = 0$  приводит к системе уравнений

$$\mathbf{K}_0 \mathbf{V}_{HT} = \langle \mathbf{K}^{(m)} \mathbf{V}^{(m)} \rangle, \quad (5)$$

где  $\mathbf{K}_0 = \langle \mathbf{K}^{(m)} \rangle$ , а угловые скобки обозначают усреднение по выборке из  $M$  элементов,  $\mathbf{K}^{(m)}$  — матрица, элементы которой определяются выражением

$$K_{ij}^{(m)} = B^{(m)2} \left( \delta_{ij} - \frac{B_i^{(m)} B_j^{(m)}}{B^{(m)2}} \right). \quad (6)$$

Тогда при  $\mathbf{K}_0 \neq 0$

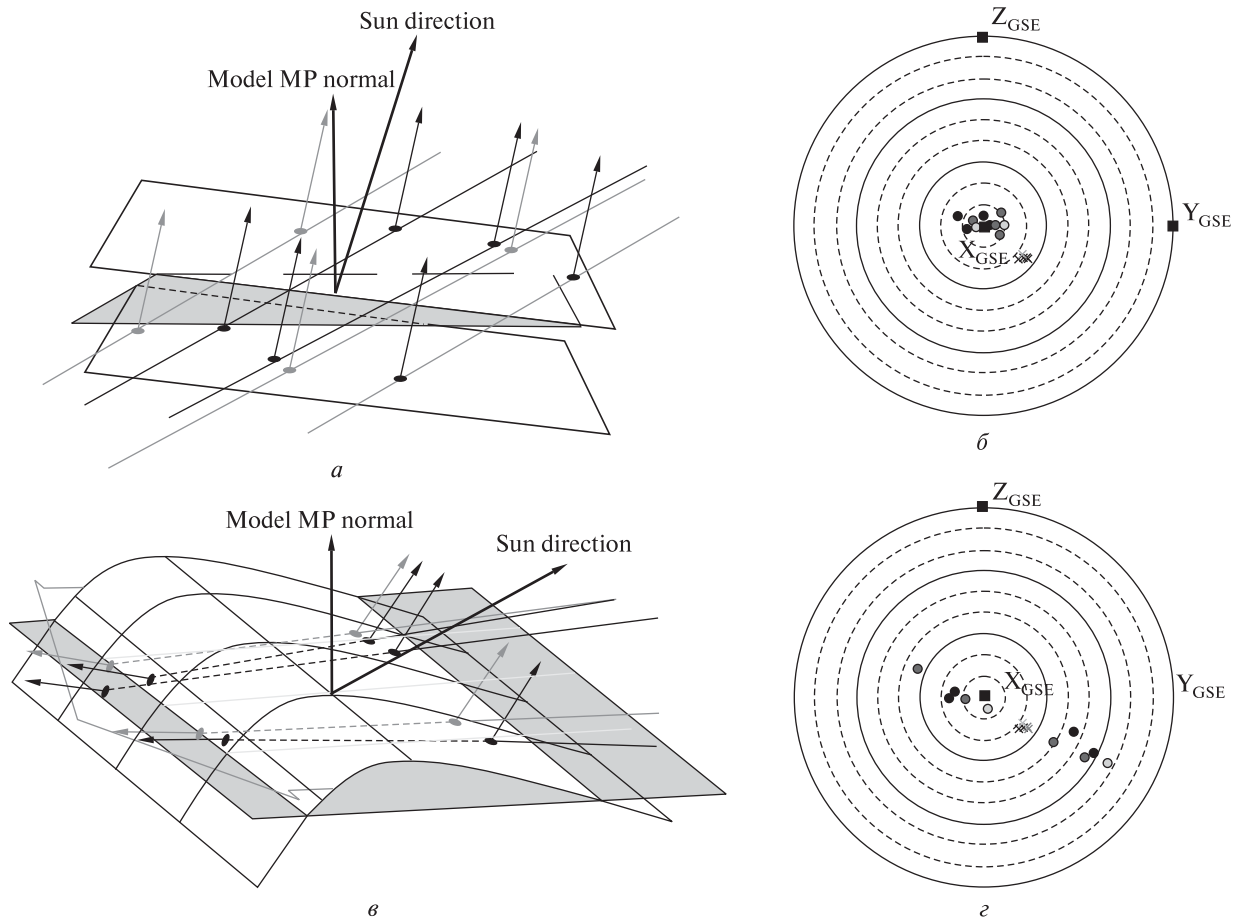
$$\mathbf{V}_{HT} = \mathbf{K}_0^{-1} \langle \mathbf{K}^{(m)} \mathbf{V}^{(m)} \rangle. \quad (7)$$

Выражение (7) определяет значение скорости  $\mathbf{V}_{HT}$  для рассматриваемой конечной выборки  $\mathbf{B}^{(m)}$  и  $\mathbf{V}^{(m)}$ . Скорость перемещения границы  $V_N$  определяется как проекция  $\mathbf{V}_{HT}$  на нормаль к поверхности разрыва, определенную методом минимума вариаций магнитного поля.

Тайминг-методика для расчета направления нормали к поверхности неоднородности и нормальной составляющей скорости ее движения основана на решении системы уравнений:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r}_{ab} \\ \mathbf{r}_{cb} \\ \mathbf{r}_{db} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = V_N \begin{pmatrix} t_{ab} \\ t_{cb} \\ t_{db} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{r}_{ab}$  — расстояние между космическими аппа-



**Рис. 2.** Анализ двух последовательных пересечений МП пятью космическими аппаратами в полярной системе координат, связанной с направлением на Солнце (описание в тексте)

ратами Th A и Th B,  $n_i$  — компоненты нормали,  $V_N$  — нормальная составляющая скорости поверхности,  $t_{ab}$  — временной интервал между пересечениями поверхности космическими аппаратами Th A и Th B. Решением этой системы уравнений будут координаты нормали и, из условия  $|n| = 1$ , нормальная к поверхности составляющая скорости МП. Пространственная конфигурация космических аппаратов THEMIS в виде линии или «нити жемчуга» не позволяет применить тайминг-методику непосредственно, так как решение системы (8) для такой конфигурации становится неустойчивым. Нормаль определялась методом минимума вариаций магнитного поля, после чего по временным интервалам между пересечениями различными космичес-

кими аппаратами определялась величина  $V_N$ . Момент пересечения космическим аппаратом МП определялся аппроксимацией составляющей магнитного поля с максимальной амплитудой изменения гиперболическим тангенсом  $a_3 + a_2 \cdot \text{th}((t - a_0)/a_1)$  на основе метода наименьших квадратов. Из коэффициентов аппроксимации определялось время пересечения и толщина МП.

Результаты определения нормалей были проанализированы в полярной системе координат, в которой полярный угол отсчитывается от направления на Солнце — оси  $X_{GSE}$ , а азимутальный угол отсчитывается от оси  $Y_{GSE}$  до проекции нормали на плоскость  $ZY_{GSE}$ . Использование такой системы координат позволяет разделить

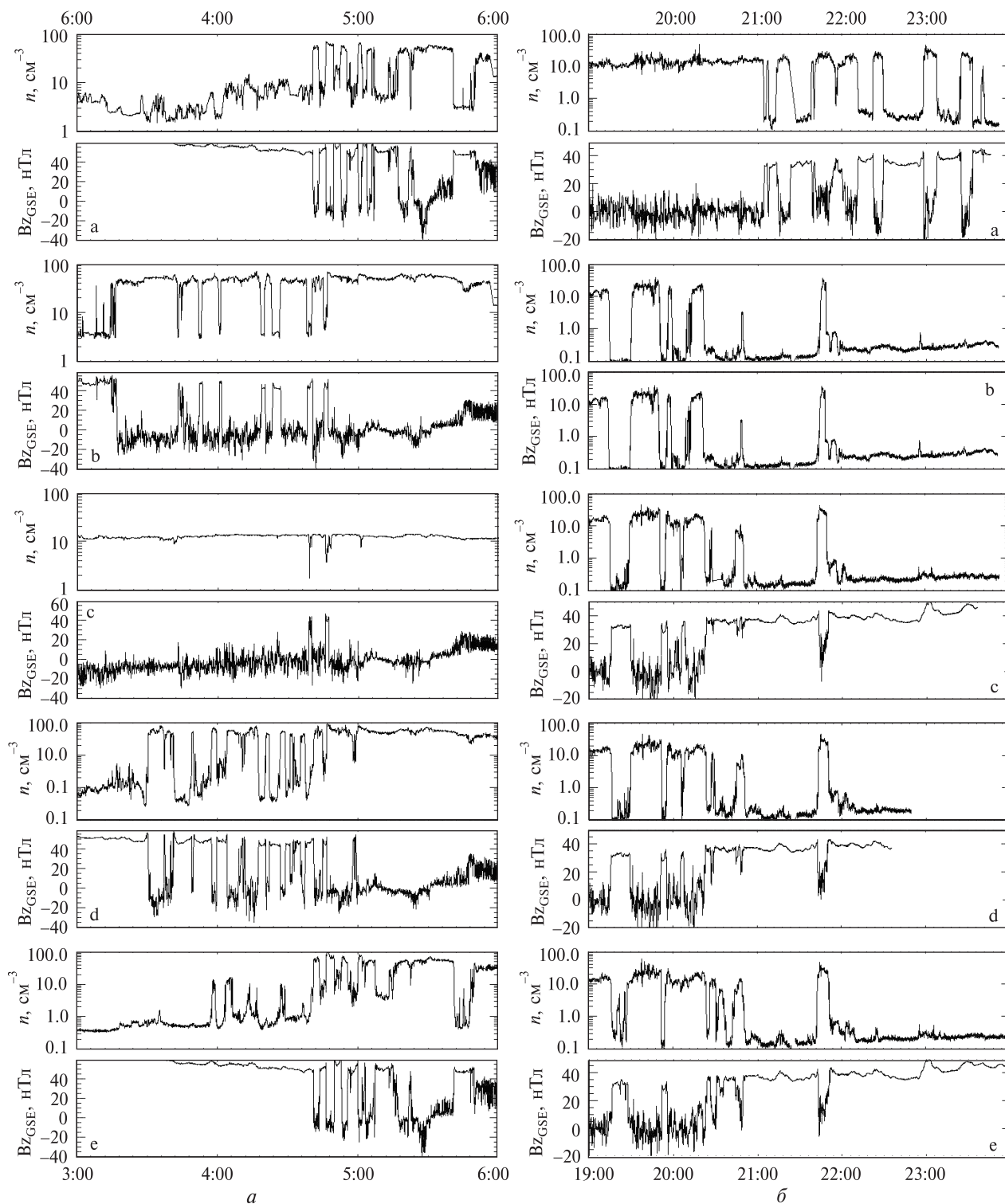
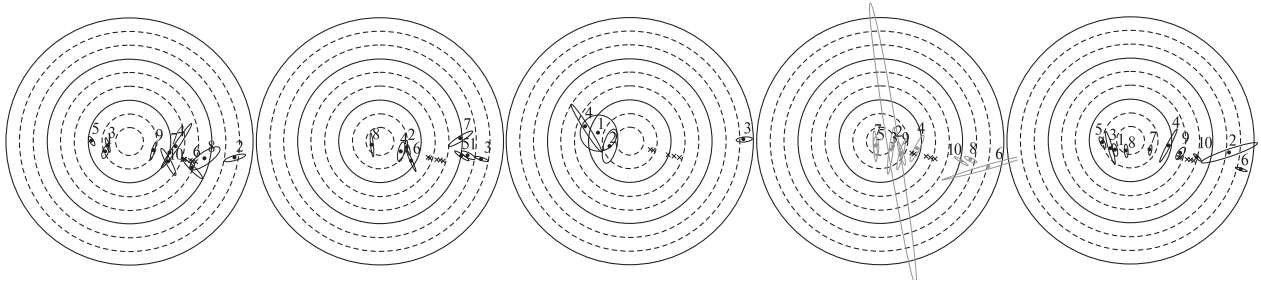
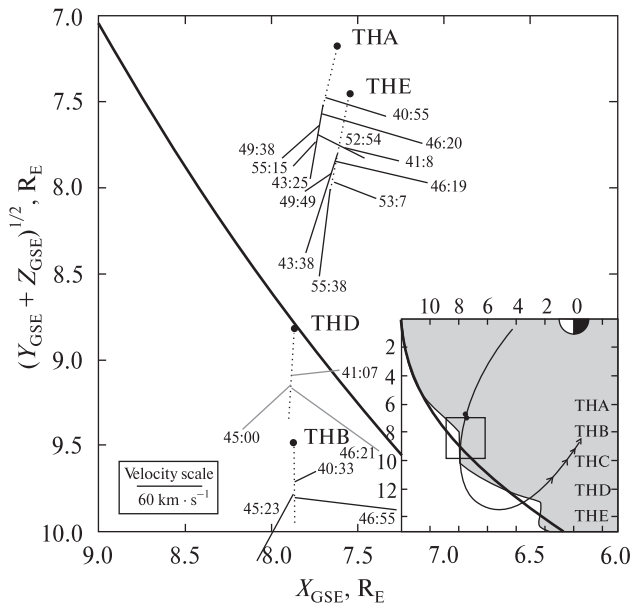


Рис. 3. Динамика  $B_z$ -составляющей магнитного поля и концентрации протонов по измерениям космических аппаратов THEMIS 15 мая 2007 г. (а) и 30 мая 2007 г. (б). Фрагменты а, б, с, д, е — данные соответствующих модулей THEMIS





**Рис. 4.** Направления нормалей к поверхности МП, определенные при пересечениях модулями THEMIS в интервале времени 3:00–6:00 UT 15 мая 2007 г.



**Рис. 5.** Нормали к поверхности, определенные при пересечениях системой THEMIS, и реконструкция динамики смещения поверхности МП в интервале времени 3:00–6:00 UT 15 мая 2007 г.

одномерные квазипериодические осцилляции поверхности и двумерные поверхностные волны на МП. При одномерном смещении МП (рис. 2, а) направления нормалей, найденных при пересечении МП при входе и выходе из магнитосферы в магнитослой и обратно, группируются около полярной оси (рис. 2, б). Направления нормалей к поверхности МП в точке пересечения МП космическим аппаратом, определенные по модели [9], показаны косыми крестиками. Участок поверхности МП, по которой двухмерное возмущение движется в хвост магнитосферы, показан на рис. 2, в. Направле-

ния нормалей при таком возмущении поверхности группируются в две группы — в магнитосферу из магнитослоя и выхода из магнитосферы (рис. 2, г). В полярной системе координат группы располагаются на линии, которая соединяет точку направления на Солнце (полярная ось) и направления модельных нормалей. Именно такая конфигурация в работе рассматривалась в качестве подтверждения прохождения от подсолнечной точки в хвост магнитосферы двумерного возмущения поверхности МП. Применение такой методики позволяет определить направление распространения двумерного возмущения по поверхности МП и возможное местонахождение источника возмущения.

#### ПАРАМЕТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СМЕЩЕНИЯ МП НА НИЗКИХ ГЕОМАГНИТНЫХ ШИРОТАХ

**Поверхностные волны на МП.** На рис. 3, а приведены измерения магнитного поля и концентрации протонов, зафиксированные системой THEMIS 15 мая 2007 г. Модули Th A, Th B, Th D и Th E многократно пересекали МП. Всего модули системы THEMIS зафиксировали более 74 пересечений в течение 3 ч. Физические условия в солнечном ветре на орбите Земли в рассматриваемый период были относительно спокойными. Динамическое давление солнечного ветра по данным измерений космического аппарата ACE было порядка 1 нПа, скорость потока плазмы 300–310 км/с без существенных возмущений. Модуль магнитного поля изменялся в диапазоне 1.7–2 нТл в основном с отрицательной составляющей  $B_z$ . Весь рассматриваемый период времени космический аппарат Th С прово-

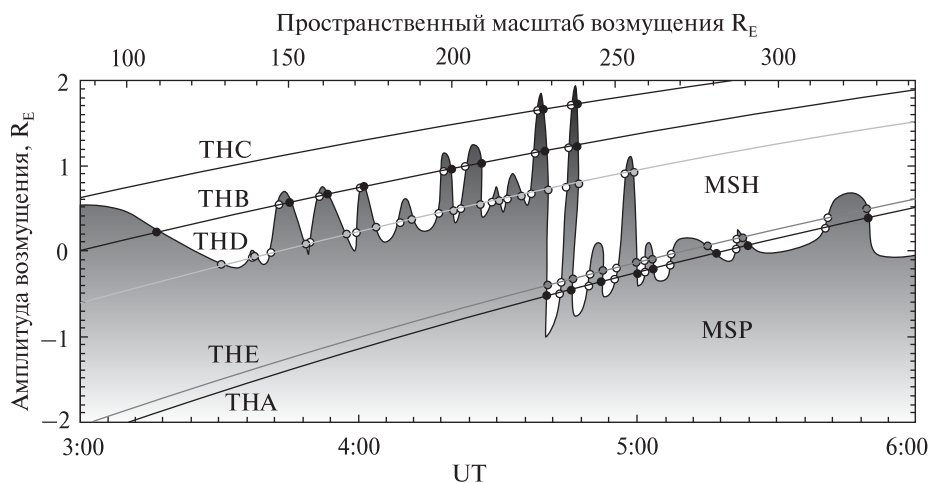


Рис. 6. Реконструкция положения поверхности МП 15 мая 2008 г. Показаны нижние пределы амплитуды смещения МП

дил измерения в магнитослое и только два коротких интервала времени оказывался в магнитосфере. Скорость потока плазмы в магнитослое составляла 120–150 км/с в низкоширотном пограничном слое 10–30 км/с вдоль поверхности МП в направлении от Солнца.

Направления нормалей, определенные при пересечении МП космическими аппаратами THEMIS, приведены на рис. 4. Нормальные

составляющие скорости смещения МП, определенные при пересечениях МП по методике де Хоффмана-Теллера, варьируют в широких пределах от 40 до 110 км/с. Полярная диаграмма, аналогичная рис. 2, на которой показаны направления нормалей, определенные при пересечении поверхности МП космическими аппаратами системы THEMIS 15 мая 2007 г., приведена на рис. 5. Точки, показывающие направления

**Средние параметры магнитного поля, концентрации протонов и скорости потока плазмы в магнитослое и в магнитосфере по измерениям космических аппаратов THEMIS в системе GSE. Приведены значения критической скорости  $V_{cr}$ , определенной по формуле (9) и проекции скорости потока плазмы в магнитослое на направление волнового вектора поверхностной волны**

Модуль КА	UT, ч	n	$B_{MSP}$	$V_{MSP}$	n	$B_{MSH}$	$V_{MSH}$	$V_{MSH}$	$V_{cr}$
THA	3–4	3.1	[1.2, 9.0, 60.9]	[2.2, -5.3, 1.1]	—	—	—	95*	113*
	4–5	6.6	[3.2, 8.0, 54.5]	[8.1, -13.09, 4.5]	61.8	[-3.4, -2.9, -7.7]	[-92.5, 38.2, -30.3]	94	84
	5–6	5.0	[4.0, 7.4, 50.5]	[15.6, -30.3, -0.4]	51.8	[-1.0, 1.4, -3.5]	[-71.8, 94.4, -26.9]	121	97
THB	3–4	4.3	[3.4, 7.2, 48.4]	[1.2, 3.9, 7.4]	46.9	[-4.2, 3.6, -8.9]	[-75.8, 100.9, -31.0]	124	127
	4–5	3.8	[3.7, 6.3, 42.4]	[-22.8, 28.8, 16.4]	48.5	[-2.4, -0.47, -7.4]	[-75.6, 98.2, -25.2]	124	99
	5–6	—	—	—	52.4	[1.6, -4.2, -2.1]	[-93.2, 97.8, -27.7]	126	116
THD	3–4	0.4	[3.2, 6.6, 47.1]	[3.8, 4.6, 20.8]	55.9	[-6.2, 3.1, -13.6]	[-70.33, 99.6, -23.4]	121	448
	4–5	2.6	[3.2, 7.8, 41.5]	[-25.8, 31.9, 12.1]	56.5	[1.7, -5.8, -7.1]	[-68.4, 89.8, -31.7]	115	105
	5–6	—	—	—	54.9	[1.9, -4.6, -2.4]	[-83.8, 94.9, -27.7]	129	108
THE	3–4	0.51	[3.2, 7.7, 55.6]	[1.7, -4.7, 5.5]	—	—	—	102*	260*
	4–5	0.9	[0.3, 7.5, 49.8]	[-6.2, -4.0, -2.3]	77.4	[-1.5, -3.2, -7.8]	[-87.1, 51.0, -29.5]	122	127
	5–6	1.0	[5.5, 5.7, 47.3]	[-8.4, 10.4, 0.4]	55.4	[-0.8, 0.1, -4.3]	[-77.0, 96.4, -28.7]	125	235

\* — значения получены экстраполяцией на соседних временных интервалах

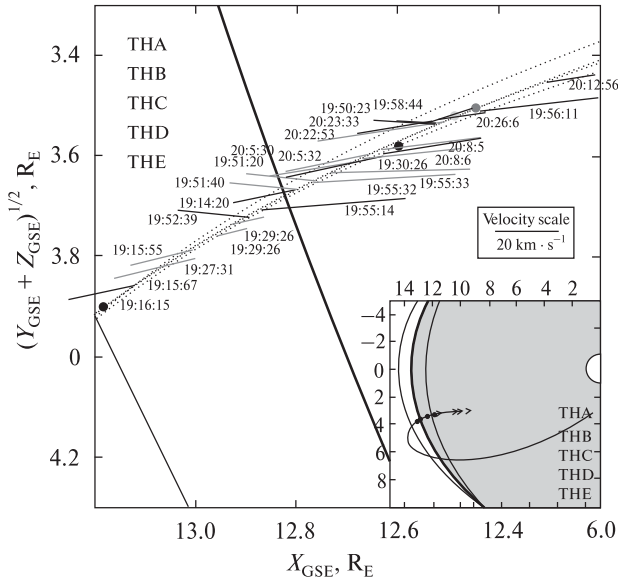


Рис. 7. Нормали к поверхности, определенные при пересечениях системой THEMIS, и реконструкция динамики смещения поверхности МП в интервале времени 19:00—21:00 UT 15 мая 2008 г.

нормалей, на полярных диаграммах группируются вдоль линии, соединяющей подсолнечную точку и точку пересечения МП космическим аппаратом. Реконструкция динамики поверхности МП (рис. 6) показала, что наблюдается прохождение двумерного квазипериодического возмущения по флангу магнитосферы в хвост со скоростью 120—160 км/с, что соответствует скорости потока протонов в магнитослое, при этом длина поверхностной волны варьирует от 7 до 10  $R_E$ . Амплитуда смещения МП от среднего положения изменялась со временем и составляла от 0.5 до 1.8  $R_E$ . Скорости движения поверхности

МП пропорциональны амплитуде смещения МП. Восстановленный профиль поверхностного возмущения показан на рис. 4. Поверхностная волна на МП несинусоидальная, с обратным укручением.

Динамика смещения поверхности МП от среднего положения приведена на рис. 6. Верхняя шкала дает представление о пространственном масштабе возмущения, полученного на основе оценки скорости смещения двумерной структуры по поверхности МП. Значения средних значений магнитного поля, концентрации протонов и скорости потока протонов в магнитосфере и в магнитослое по измерениям системы THEMIS приведены в таблице. В таблице приведены значения критической скорости, вычисленной по формуле [24]

$$(\mathbf{v}_{cr} \cdot \mathbf{k})^2 = \frac{\rho_1 + \rho_2}{\mu_0 \rho_1 \rho_2} [(\mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{k})^2 + (\mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{k})^2], \quad (9)$$

где  $\rho$  — плотность плазмы,  $\mathbf{B}$  — индукция магнитного поля,  $\mathbf{k}$  — волновой вектор поверхностной волны, а индексы 1 и 2 относятся к параметрам в магнитосфере и в магнитослое соответственно. Скорость, определенная по формуле (9), дает оценку критической скорости потока плазмы, превышение которой приводит к развитию на поверхности неустойчивости Кельвина — Гельмгольца [24]. По измерениям Th A, Th B и Th D скорость в магнитослое превышала критическую скорость в интервале времени 4—5<sup>h</sup> UT (таблица). Характерный интервал роста амплитуды возмущения 600—720 с, а интервал, определенный по наблюдаемому росту амплитуды смещения МП, равен 1000—1500 с (рис. 6).

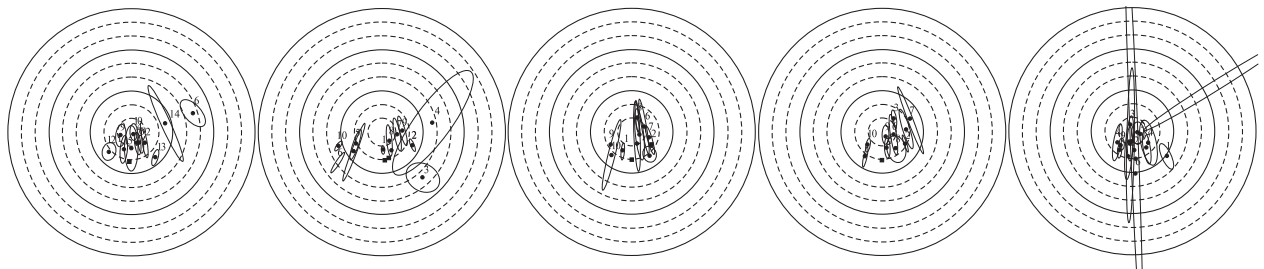


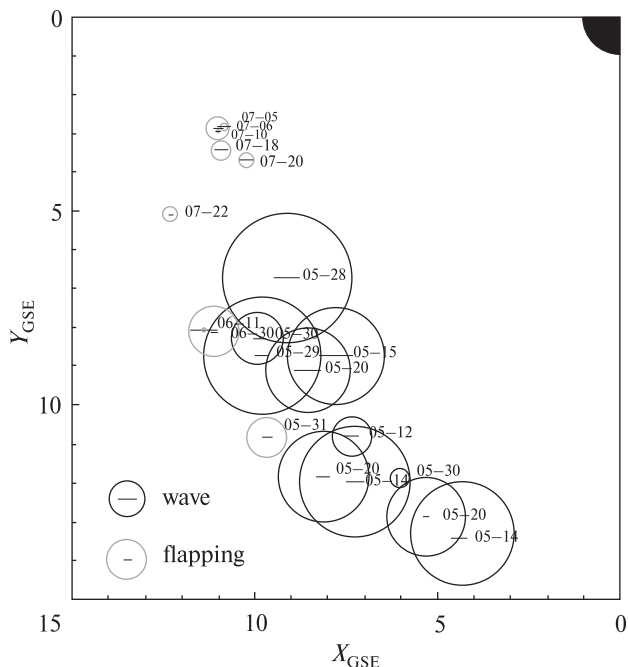
Рис. 8. Направления нормалей к поверхности МП, определенные при пересечениях границы модулями THEMIS в интервале времени 19:00—21:00 UT 30 мая 2007 г.



Отличия в показателях могут быть связаны с неучетом сжимаемости плазмы и изменением угла между волновым вектором и магнитным полем.

**Одномерное квазипериодическое смещение поверхности МП.** В случае наблюдения одномерного квазипериодического движения МП при пересечении в направлении магнитосфера — магнитослой и возврате в магнитосферу нормали к поверхности МП имеют одно выделенное направление. Результаты анализа многократного пересечения МП системой THEMIS 7 августа 2007 г., во время которого наблюдались одномерные осцилляции положения МП, приведены на рис. 3, б. Давление солнечного ветра по измерениям плазменных параметров на борту космического аппарата ACE монотонно возрастало от 1 до 1.4 нПа в 23:00 UT. Скорость потока протонов монотонно убывала от 365 до 345 км/с с двумя выбросами в 23:00 UT (до 365 км/с) и в 23:30 UT (до 355 км/с). Значение магнитного поля увеличивалось с 1.8 до 2.8 нТл, составляющая  $V_z$  была положительной, а в 22:05 UT поменяла знак.

Система THEMIS находилась в рассматриваемый период в окрестности подсолнечной точки магнитопаузы и располагалась почти вдоль радиуса-вектора, проведенного из центра Земли. На рис. 3, б хорошо видно, что моментам выхода модулей Th C, Th B, Th D и Th E из магнитосферы соответствуют повышенные значения составляющей  $Z_{GSE}$  магнитного поля (и абсолютного значения магнитного поля) внутри магнитосферы, наблюдаемые одновременно в измерениях всех модулей с нулевым сдвигом фаз. Амплитуда возмущения тем больше, чем ближе к МП находится космический аппарат. В параметрах солнечного ветра в рассматриваемый период не наблюдается изменений, которые могли бы вызвать наблюдаемые возмущения токовой системы МП. Направления нормалей, определенные в моменты пересечения МП, приведены на рис. 7 и 8. Все направления нормалей в пределах  $30^\circ$  совпадают с направлением оси  $X_{GSE}$ . Наблюдаемые возмущения магнитного поля, сопровождаемые одномерным смещением положения МП, связаны со стоячими магнитозвуковыми волнами (cavity modes) между



**Рис. 9.** Сценарий генерации поверхностных волн на экваториальной МП. Справа приведена частичная статистика наблюдений динамики экваториальной МП в 2007 г. Точки — волновые события, серые кружки — одномерное поступательное движение поверхности МП. Радиус окружностей показывает максимальную зафиксированную скорость в отдельном событии (радиус окружностей на легенде соответствует 50 км/с). Горизонтальные линии в центре окружностей — оценка максимальной амплитуды смещения МП в отдельном событии

МП и точкой отражения во внутренней магнитосфере. При наблюдаемом периоде осцилляций 4—10 мин и амплитуде порядка  $1R_E$  скорость перемещения положения МП должна была бы составлять 10—30 км/с, что и наблюдается в эксперименте.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 9, б показаны пространственные положения системы THEMIS во время наблюдения периодических смещений положения МП. Черным цветом показаны идентифицированные поверхностные волны, распространяющиеся в хвост магнитосферы, серым — одномерные осцилляции. Радиус окружностей показывает максимальные скорости смещения поверхности

МП, зафиксированные в данном событии. Черные горизонтальные линии — амплитуду смещения поверхности МП. В целом эти результаты хорошо согласуются с результатами работы [4], в которой были исследованы условия развития неустойчивости КГ на МП на основе измерений космического аппарата «Эксплорер-18». В работе [4] показано, что на МП в подсолнечном регионе условия развития неустойчивости КГ не удовлетворяются. Азимутальный угол раствора (угол отсчитывается от оси  $X_{GSE}$  в плоскости  $XU$ ), определяющий устойчивую область МП, зависит от геомагнитной активности и варьирует от  $74^\circ$  для значений  $K_p \leq 2$  до  $24^\circ$  для  $K_p > 2$ . Как видно из рис. 9, б, области наблюдения волновых структур на поверхности МП действительно расположены за границами угла раствора, оценка значения которого лежит в диапазоне  $33\text{--}45^\circ$ . В работе [6] показано, что низкоширотная МП наиболее подвержена развитию неустойчивости КГ, а с увеличением геомагнитной широты критерий развития неустойчивости перестает удовлетворяться. Это связано с уменьшением среднего угла между векторами магнитного поля в магнитослое и в магнитосфере Земли при росте геомагнитной широты наблюдения.

Проведенный анализ большого массива наблюдений многократных пересечений МП системой THEMIS в 2007 г. дает возможность сделать вывод о том, что наблюдаемые квазипериодические смещения поверхности МП являются проявлениями одного события в различных регионах магнитосферы. Периодические смещения поверхности МП в подсолнечном регионе связаны с собственными колебаниями дневной магнитосферы (cavity modes), рассчитанный период которых 4–6 мин близок к периоду наблюдаемых колебаний положения МП. Эти колебания приводят к возникновению возмущений на поверхности МП, которые сносятся в хвост магнитосферы.

## ВЫВОДЫ

В данной работе проанализированы измерения магнитного поля и плазменных параметров магнитосферы Земли, зафиксированные на борту

космических аппаратов системы THEMIS в марте — сентябре 2007 г. Измерения проводились на промежуточной орбите в вечернем, дневном и утреннем секторах низкоширотной магнитосферы. Проанализировав измерения магнитного поля, концентрации протонов и скорости потока плазмы при 135 многократных пересечениях МП системой THEMIS, были получены следующие результаты.

1. Идентифицированы два различных типа смещения поверхности экваториальной магнитосферы: одномерного движения как целого (flapping) и движения по поверхности магнитосферы двухмерных волновых структур (waving). Предложенная в работе методика позволяет разделить их и определить направление движения двухмерного возмущения поверхности МП.

2. Определены параметры волновых возмущений МП: период повторения  $T = 2\text{--}10$  мин, амплитуда смещения поверхности МП  $A = (0.3\text{--}2)R_E$ , скорость движения возмущения  $V = 150\text{--}220$  км/с, длина волны  $\lambda = (3\text{--}15)R_E$ , нормальная составляющая скорости смещения МП  $V_n = 50\text{--}150$  км/с. Поверхностные волны наблюдались на флангах магнитосферы.

3. Для одномерных колебаний положения поверхности МП характерна меньшая скорость смещения МП:  $V_n = 10\text{--}90$  км/с. Другие параметры движения поверхности при этом меняются в диапазонах: период колебаний  $T = 3\text{--}10$  мин, амплитуда  $A = (0.3\text{--}1)R_E$ . Одномерные периодические смещения положения МП наблюдались в подсолнечном регионе МП.

4. Генерация волновых структур на флангах магнитосферы связана с собственными колебаниями дневной магнитосферы и вызванными ими неоднородностями поверхности МП. Таким образом, осцилляции подсолнечной МП и волновые структуры на флангах магнитосферы, распространяющиеся в хвост, являются проявлениями единого процесса в разных регионах экваториальной МП. Неоднородности поверхности МП, возникающие при колебаниях подсолнечной МП, сносятся в хвост со скоростью потока плазмы в магнитослое. Поскольку осцилляции имеют квазипериодический характер,

на флангах магнитосферы наблюдаются волно-подобные возмущения, амплитуда которых может существенно увеличиваться при развитии неустойчивости Кельвина–Гельмгольца.

Автор благодарит CSDSweb- и NASA SSC-сервисы за предоставление данных измерений космических аппаратов WIND и ACE. Автор очень признателен команде проекта THEMIS за возможность использовать в работе данные измерений космических аппаратов THEMIS. Также автор хочет поблагодарить Комитет космических исследований (Committee on Space Research, COSPAR) и организационный комитет семинара «Solar-Terrestrial Interactions: Instrumentation and Techniques» (Синая 2007 г.), где положено начало данной работе. Автор очень благодарен профессору К.-Х. Гласмайеру и Техническому университету г. Брауншвайг за предоставленную возможность выступить с семинаром и за плодотворное обсуждение результатов работы.

- Anderson K., Binsack J., Fairfield D. Hydromagnetic disturbances of 3- to 15-minute period on the magnetopause and their relation to bow shock spikes // J. Geophys. Res. — 1968. — **73**, N 7. — P. 2371–2386.
- Angelopoulos V. The THEMIS mission // Space Sci. Rev. — 2008. — **141**. — P. 5–34.
- Auster H. U. et al. The THEMIS fluxgate magnetometer // Space Sci. Rev. — 2008. — **141**. — P. 235–264.
- Boller B., Stolor H. Explorer 18 study of the stability of the magnetopause using a Kelvin-Helmholtz instability criterion // J. Geophys. Res. — 1973. — **78**, N 34. — P. 8078–8086.
- Cahill L., Winckler J. Periodic magnetopause oscillations observed with the GOES satellites on March 24 // J. Geophys. Res. — 1992. — **97A**, N 6. — P. 8239–8243.
- Contin J. E., Gratton F. T., Farrugia C. J. Theoretical results on the latitude dependence of the Kelvin-Helmholtz instability at the dayside magnetopause for northward interplanetary magnetic fields // J. Geophys. Res. — 2003. — **108A**, N 6. — P. 1227. — doi:10.1029/2002JA009319.
- DeHoffmann F., Teller E. Magneto-hydrodynamic shocks // Phys. Rev. — 1950. — **80**. — P. 692.
- Dunlop M.W., Balogh A., Glassmeier K.-H. Four-point CLUSTER application of magnetic field analysis tools: the discontinuity analyzer // J. Geophys. Res. — 2002. — **107A**, N 11. — doi:10.1029/2001JA005089.
- Fairfield D. H. Average and unusual locations of the Earth's magnetopause and bow shock // J. Geophys. Res. — 1971. — **76**. — P. 6700–6716.
- Khrabrov V. A., Sonnerup B. U.Ö. Orientation and motion of current layers: Minimization of the Faraday residue // Geophys. Res. Lett. — 1998. — **25**. — P. 2373–2376.
- Khrabrov V. A., Sonnerup B. U. Ö. DeHoffmann-Teller analysis // Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data / Eds G. Paschmann, P. W. Daly. — Noordwijk, Netherlands, ESA Publ. Div., 1998. — 1850 p.
- Kivelson M. G., Chen S. H. The magnetopause: Surface waves and instabilities and their possible dynamical consequences // AGU Monograph 90, Physics of Magnetopause / Eds P. Song, B.U.O. Sonnerup. — Washington, D.C., 1995. — P. 257.
- Kokubun S., Kawano H., Mukai T., et al. Surface waves on the dawn magnetopause: Connection with ground PC 5 pulsations // Adv. Space Res. — 2000. — **25**, N 7–8. — P. 1493–1502.
- McFadden J. P., Carlson C. W., Larson D., et al. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration // Space Sci. Rev. — 2008. — **141**. — P. 277–302.
- Owen C. J., Taylor M. G. G. T., Krauklis I. C., et al. Cluster observations of surface waves on the dawn flank magnetopause // Ann. Geophys. — 2004. — **22**. — P. 971–983.
- Paschmann G., Haaland S., Sonnerup B. U. O., et al. Characteristics of the near-tail dawn magnetopause and boundary layer // Ann. Geophys. — 2005. — **23**. — P. 1481–1497.
- Phan T. D., Paschmann G. Low-latitude dayside magnetopause and boundary layer for high magnetic shear 1. Structure and motion // J. Geophys. Res. — 1996. — **101**. — P. 7801–7816.
- Russell C. T., Mellott M. M., Smith E. J., King J. H. Multiple spacecraft observations of interplanetary shocks: Four spacecraft determination of shock normals // J. Geophys. Res. — 1983. — **88**. — P. 4739–4748.
- Russell C. T., Petrinec S. M., Zhang T. L., et al. The effect of foreshock on the motion of the dayside magnetopause // Geophys. Res. Lett. — 1997. — **24**. — P. 1439–1442.
- Shafrankova J., Zastenker G., Nemecek Z., et al. Small scale observation of magnetopause motion: preliminary results of the INTERBALL project // Ann. Geophys. — 1997. — **15**. — P. 562–569.
- Smith E., Davis L. Magnetic measurements in the Earth's magnetosphere and magnetosheath: Mariner 5 // J. Geophys. Res. — 1970. — **75**, N 7. — P. 1233–1245.
- Song P., Russell C., Fitzenreiter R., et al. Structure and properties of the subsolar magnetopause for northward interplanetary magnetic field: Multiple-instrument particle observations // J. Geophys. Res. — 1993. — **98A**, N 7. — P. 11319–11337.
- Sonnerup B. U. O., Scheible M. Minimum and maximum variance analysis // Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data / Eds G. Paschmann, P. W. Daly. — Noordwijk, Netherlands, ESA Publ. Div., 1998. — 1850 p.

24. Walker A. D. M. The Kelvin-Helmholtz instability in the low-latitude boundary layer // Planet. Space Sci. — 1981. — 829. — P. 1119—1133.

*Надійшла до редакції 10.11.08*

*O. V. Agapitov*

#### DYNAMICS OF THE LOW LATITUDE TERRESTRIAL MAGNETOPAUSE FROM THEMIS MEASUREMENTS

Multi-spacecraft THEMIS observations in temporal orbit during March — September 1997 provide a unique opportunity to collect material on the dayside magnetopause surface dynamics. During this period THEMIS crossed the magnetopause surface more than 300 times. About half of observed crossings were found to be a multicrossing (several inward and outward crossing of a single spacecraft during short-term interval). Taking into account the magnetopause surface normal velocity magnitude (averaged normal velocity is about 40 km/s), we speculate what periodic oscillations of the magnetopause position were observed. Two types of the magnetopause motion, namely, «flapping» (one-dimensional change of surface position) and «waving» (two-dimensional structure propagation) were found. Amplitudes of observed oscillations

were estimated to be in the range of  $(0.1-2.2)R_E$ . The algorithm based on minimum variance analysis for surface normal definition, the Hoffman-Theller and timing surface velocity definition technique is proposed to distinguish these two types of the magnetopause surface dynamics. Two-dimensional wavelike travelling disturbances were found mainly on the flanks of the magnetosphere. The magnetopause motion normal velocity was found to lie in the range of 50 to 150 km/s. One-dimensional flapping of the surface (the magnetopause motion normal velocity was found to be in the range from 10 to 70 km/s) was observed predominantly in the midday magnetosphere sector. We speculate that such quasi-periodic motion is the manifestation of the same phenomena in different magnetosphere regions. The generation can be initiated by dayside magnetosphere cavity modes (such events were associated with the magnetopause surface oscillations in several cases) or quasiperiodic changes of solar wind parameters. Surface disturbances are driven by magnetosheath plasma flow tailward with velocity about 140—180 km/s. In the case of periodic oscillations of the subsolar magnetopause the wavelike structures can be observed on the flanks of the magnetopause. The amplitude of surface disturbances can be increased by the Kelvin — Helmholtz instability.